

EL HOMBRE Y LA MÁQUINA

El Hombre y la Máquina

ISSN: 0121-0777

maquina@uao.edu.co

Universidad Autónoma de Occidente

Colombia

Corona, Arturo; Moctezuma, Jorge; Reyes, Fernando; Campos, Roberto

Nueva plataforma de entrenamiento para robots manipuladores

El Hombre y la Máquina, núm. 28, enero-junio, 2007, pp. 108-115

Universidad Autónoma de Occidente

Cali, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47802813>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Nueva plataforma de entrenamiento para robots manipuladores



ARTURO CORONA
JORGE MOCTEZUMA
FERNANDO REYES
ROBERTO CAMPOS*

Resumen

En este artículo se presenta una nueva plataforma de programación para robots manipuladores, denominada entrenamiento para robots, la cual tiene el objetivo de resolver el problema de validar nuevos algoritmos de control experimentalmente en un robot de tres grados de libertad de transmisión directa, además se muestra un ejemplo de los algoritmos de control con demostración asintótica global en el sentido de Lyapunov y probados en la plataforma de programación.

Palabras clave: Programación, robots, entrenamiento, control.

Abstract

In this paper a new programming platform for robots manipulators appears, that is denominated, “robots training”, which has the objective to solve the problem experimentally to validate new control algorithms on a three degrees of freedom direct drive robot manipulator, in addition is showed an example of control algorithms with global asymptotic stability demonstration in the sense of Lyapunov and proven in the programming platform.

Key words: Robot Manipulators, Lyapunov function, Direct drive, Control algorithms, Robot Training

* Grupo de Robótica de la Facultad de Ciencias de Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla–México. arcorona@ece.buap.mx, jorgem@siu.buap.mx, freyes@ece.buap.mx, rcn@mexico.com

Fecha de recepción: junio de 2006 Fecha de aceptación: septiembre de 2006

1. Introducción

Motivados en el interés teórico práctico de resolver el problema de diseño y validación experimental de nuevos controladores de posición en un robot, de manera rápida y sencilla, se propone la siguiente plataforma experimental de entrenamiento para un robot de tres grados de libertad.

El control de movimiento o el control de trayectorias es uno de los tópicos más importantes en el control de robots manipuladores. El control de movimiento es usado cuando los brazos robot se mueven en un espacio de trabajo libre siguiendo una trayectoria sin interactuar con el medio ambiente. Actualmente, la mayoría de los manipuladores son operados por controladores con una parte proporcional y una derivativa (PD) y con parte proporcional, integral y derivativa (PID).

Es bien sabido que el controlador PID carece de estabilidad asintótica global.¹⁻² En contraste, el controlador PD con compensación de gravedad puede ser considerado como un clásico control de robots el cual tiene estabilidad asintótica global.³⁻⁵

La organización de este artículo es la siguiente: la sección II presenta el modelo dinámico de un robot de n g.d.l., en la sección III describe el planteamiento del problema, en la sección IV se presenta el diseño de la familia de controladores con acciones acotadas donde se abordan dos casos de estudio, la sección V describe la plataforma experimental, la sección VI presenta resultados experimentales de los controladores e índice de desempeño y finalmente en la sección VII se mencionan las conclusiones.

2. Modelo dinámico

En ausencia de fricción y otras perturbaciones el modelo dinámico para un robot de n g.d.l se escribe como:⁶

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

donde $M(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$ es la matriz de inercia, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de fuerzas centrifugas y de Coriolis, $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de pares gravitacionales y $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ es un vector de fuerzas y pares aplicados en las uniones mediante los actuadores. Los vectores $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$ denotan la posición, velocidad y aceleración angular, respectivamente.

Aunque las ecuaciones de movimiento son complejas, éstas poseen algunas propiedades fundamentales que pueden usarse para facilitar el diseño de controladores, así como su demostración de estabilidad. Fundamentalmente se hará uso de la siguiente propiedad:

Propiedad 1. La matriz $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ y la derivada temporal de la matriz de inercia $M(\mathbf{q})$ satisfacen la siguiente ecuación:

$$\dot{\mathbf{q}}^T \left[\frac{1}{2} \dot{M}(\mathbf{q}) - C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right] \dot{\mathbf{q}} = 0 \quad \forall \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n. \quad (2)$$

3. Planteamiento del problema

La plataforma de entrenamiento pretende que de manera sencilla cualquier usuario sin tener grandes conocimientos de robótica o programación, pueda definir una trayectoria con solo tomar suavemente al robot por su extremo final o herramienta y llevarlo por todos los puntos en que la aplicación industrial lo requiera, y de esta forma el robot pueda posteriormente reproducir exactamente la trayectoria antes definida y además poderlo realizar de manera repetitiva hasta terminar la aplicación industrial.

El objetivo de control de posición pura, o simplemente control de posición, consiste en determinar $\boldsymbol{\tau}$ de tal forma que:⁷

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{q}(t) = \mathbf{q}_d \quad (3)$$

donde $\mathbf{q}_d \in \mathbb{R}^n$ es un vector constante.

El cálculo del vector $\boldsymbol{\tau}$ involucra generalmente a una función vectorial no lineal de $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$. Esta función se denomina “ley de control” o simplemente controlador.⁸

4. Diseño de la plataforma de entrenamiento

Menú de operación

Para seleccionar el modo de trabajo del sistema el programa cuenta con un menú en el cual el usuario podrá seleccionar si desea grabar o reproducir una trayectoria.

Seleccione el modo de operación:

- 1- Modo grabar
- 2- Modo reproducir

Modo:

Modo grabar

Al seleccionar esta opción el usuario podrá tomar al robot e indicarle mediante un guiado manual todos los puntos por los cuales quiere que pase el robot al realizar cualquiera que sea la aplicación industrial. En este modo se aplica a los motores del robot una compensación de gravedad, para que se pueda manipular como si el

robot no pesara. La compensación usada se muestra a continuación:

$$g(q) = \begin{bmatrix} g(l_1 m_1 + m_2 l_1) \sin(q_1) + g m_2 l_1 \sin(q_1 + q_2) \\ g m_2 l_1 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$

Una vez seleccionada esta opción el programa presentará un mensaje como el que se muestra en seguida:

Estableciendo posición de reposo
q1=0.00 q2=0.00 q3=0.00

Este mensaje nos indica que el robot se encuentra listo para poder guiarlo hasta una posición llamada Posición de Reposo, conforme el robot empiece a ser manejado por el usuario se observará en pantalla cómo se va modificando la posición de la base, hombro y codo partiendo desde cero.

Ya situado en la posición de reposo, el usuario deberá presionar la tecla SPACE para comenzar a realizar la grabación, es decir, que mientras esta tecla no sea pulsada, el usuario podrá permanecer manipulando el robot y eligiendo cual es la posición de inicio. Cuando se presione SPACE comienzan a grabarse en un archivo las posiciones actuales con un periodo de muestreo de 2.5ms, de esta manera van quedando registradas todas las posiciones por donde cada una de las articulaciones sean posicionadas durante la grabación. En este modo de operación el programa escribe en un archivo llamado grabar.dat los valores de las variables q1,q2,q3 (posición actual en grados de la base hombro y codo)

Es posible durante la grabación mediante la tecla “P” (cualquier tecla asignada que se desee) poder habilitar uno o mas pines del puerto paralelo de tal forma que este pueda accionar alguna herramienta, ya sea una garra, una pistola de aire, una válvula, un soplete etc. y además guardar en el mismo archivo los instantes en los cuales se accionó dicha herramienta para su posterior reproducción. Para finalizar la grabación de la trayectoria en la aplicación es necesario presionar la tecla ESCAPE y así salir del programa.

Modo reproducir

Cuando se selecciona el modo reproducción el programa automáticamente comienza a leer el archivo de posiciones creado durante la operación de grabar, consiste en leer del mismo archivo grabar.dat los valores de q1,q2,q3 y asignarlos al valor de qd1, qd2, qd3 (valores de las posiciones deseadas) y lee también el valor de la condición de la herramienta en cada periodo de muestreo.

Una vez que se llega a leer el final del archivo, el apuntador se lleva al inicio del archivo para así poder realizar una labor secuencial, para un mejor funcionamiento es necesario que la posición inicial sea cercana a la posición final del robot. Así una vez que llega a esta posición inicial, de igual manera cada periodo de muestreo la posición deseada de cada articulación del robot es actualizada a partir del archivo de grabación, y similarmente se irá leyendo la condición del puerto en caso de utilizar una o más herramientas.

Conforme el robot va reproduciendo la trayectoria, tanto su posición actual como su posición deseada se van modificando, es decir, cada vez que el programa hace una lectura del archivo este valor es asignado a la posición deseada y la posición en que se encuentra en ese momento es tomado como posición actual, por consiguiente el programa a través de la acción del controlador propuesto tratará de llevar al robot a cada posición deseada de la trayectoria. Ya que el periodo de muestreo es lo suficientemente rápido, cada posición grabada del archivo se encuentra muy cerca una de otra de tal forma que el controlador puede fácilmente llevar al robot de la posición actual a la siguiente reproduciendo la trayectoria punto a punto.¹³⁻¹⁴ En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo de programa que describe cómo se van realizando las operaciones en el programa.

5. Casos de estudio

Conscientes de las condiciones descritas en la sección del modelo dinámico se proponen nuevos algoritmos de control, dados por la ecuación siguiente:

$$\tau = K_p [1 - \alpha e^{-\alpha \tilde{q}^2}(\tilde{q})] f(\tilde{q}) - K_v [1 - \alpha e^{-\alpha \tilde{q}^2}(\tilde{q})] f'(\tilde{q}). \quad (4)$$

De dicha ecuación se desprenden los siguientes controladores de posición con estabilidad basado en el criterio de Lyapunov, caso de estudio 1 y 2

Caso de estudio 1

Considere la ecuación dinámica de un robot de n g.d.l (1), la cual en combinación con el controlador 1 se puede escribir la ecuación en lazo cerrado como:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{q} \\ M^{-1}(q)[K_p(1 - \alpha \cosh(\tilde{q})) \exp(-\alpha \cosh(\tilde{q})) \tanh(\tilde{q})] \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & -K_v (\tanh(\tilde{q}) + C(q, \dot{q}, \tilde{q})) \\ & \tau = K_p [1 - \alpha \cosh(\tilde{q})] e^{-\alpha \cosh(\tilde{q})} \tanh(\tilde{q}) - K_v \tanh(\tilde{q}) + g(q) \end{aligned} \quad (6)$$

que es una ecuación diferencial autónoma, y en espacio de estados el origen es el único punto de equilibrio, el cual se puede escribir como $\{\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}\} = \{0, 0\}$.

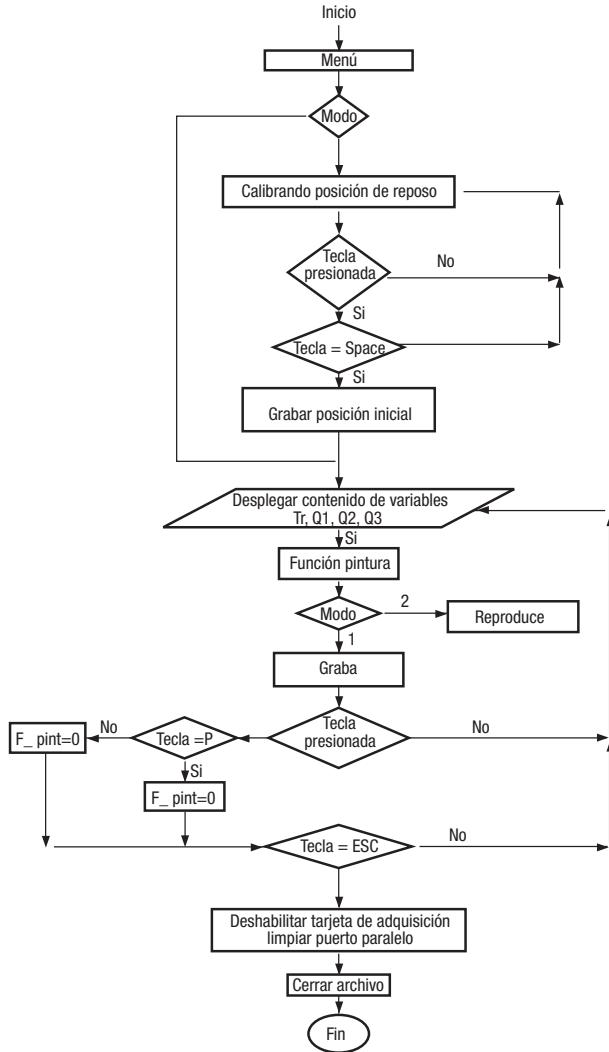


Figura 1. Diagrama de flujo de la plataforma de entrenamiento.

Para el análisis de estabilidad de la ecuación (5), proponemos la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$v(\bar{q}, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + K_p [\ln \cosh(\bar{q}) + \exp(-\cosh(\bar{q})) - e]. \quad (7)$$

De donde el primer término de $v(\bar{q}, \dot{q})$ es una función definida positiva con respecto a \dot{q} porque $M(q)$ es una matriz definida positiva, la segunda parte de la función candidata de Lyapunov (7) es una función definida positiva con respecto al error de posición \bar{q} . La derivada de la función candidata de Lyapunov a lo largo de la trayectoria de lazo cerrado puede ser escrita como:

$$\dot{v}(\bar{q}, \dot{q}) = \dot{q}^T K_p (1 - \alpha \cosh(\bar{q}) \exp(-\alpha \cosh(\bar{q}))) \tanh(\bar{q}) \leq 0 \quad (8)$$

que es una función semidefinida negativa, con lo cual concluimos estabilidad del punto de equilibrio. Para

probar estabilidad asintótica se aplicara el teorema de La Salle, con lo cual el punto de equilibrio es global y asintóticamente estable [7].

Caso de estudio 2

Considere la ecuación dinámica de un robot de n.g.d.l (1), la cual en combinación con el controlador 2 se puede escribir la ecuación en lazo cerrado como:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M^{-1}(q) [K_p(1 - \alpha \exp(-\alpha \cosh(\bar{q})) \tanh(\bar{q}))] \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{q} &= K_p [\ln \cosh(\bar{q}) + C(q, \dot{q}) \dot{q}] \\ \tau &= K_p [1 - \alpha e^{-\alpha \cosh(\bar{q})}] \tanh(\bar{q}) \\ &\quad - K_v [\tanh(\bar{q})] + g(q) \end{aligned} \quad (10)$$

que es una ecuación diferencial autónoma, y en espacio de estados el origen es el único punto de equilibrio, el cual se puede escribir como $\{\dot{q}, \bar{q}\} = \{0, 0\}$.

Para el análisis de estabilidad de la ecuación (9), proponemos la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$v(\bar{q}, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + K_p [\ln \cosh(\bar{q}) + \exp(-\cosh(\bar{q})) - 1] \quad (11)$$

donde el primer término de $v(\bar{q}, \dot{q})$ es una función definida positiva con respecto a \dot{q} porque $M(q)$ es una matriz definida positiva, la segunda parte de la función candidata de Lyapunov (11) es una función definida positiva con respecto al error de posición \bar{q} .

La derivada de la función candidata de Lyapunov a lo largo de la trayectoria de lazo cerrado puede ser escrita como:

$$\dot{v}(\bar{q}, \dot{q}) = \dot{q}^T K_p (1 - \alpha \exp(-\alpha \cosh(\bar{q}))) \tanh(\bar{q}) \leq 0 \quad (12)$$

que es una función semidefinida negativa, con lo cual concluimos estabilidad del punto de equilibrio. Para probar estabilidad asintótica se aplicara el teorema de La Salle, con lo cual el punto de equilibrio es global y asintóticamente estable [7].

6. Plataforma experimental

El experimento se realizó en un robot diseñado y construido en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Este es un manipulador con tres grados de libertad capaz de moverse en su espacio tridimensional de 90 cm. (ver en la Figura 2). El cual fue elaborado con la tecnología de motores de transmisión directa, sin escobillas, de la serie Dynaserv de Parker Compumotor. Entre sus ventajas se incluyen tiempo de establecimiento más rápido que el de un servo motor tradicional, rotación suave a baja velocidad, capacidad para operar en

modo torque, posición y velocidad, ficción articular significativamente baja.⁵

Tabla 1: Servos del robot experimental

Eslabón	Modelo	Torque Nm)	P/rev
Base	DM1050A	50	1024000
Hombro	DM1150A	150	1024000
Codo	DM1115B	15	655360

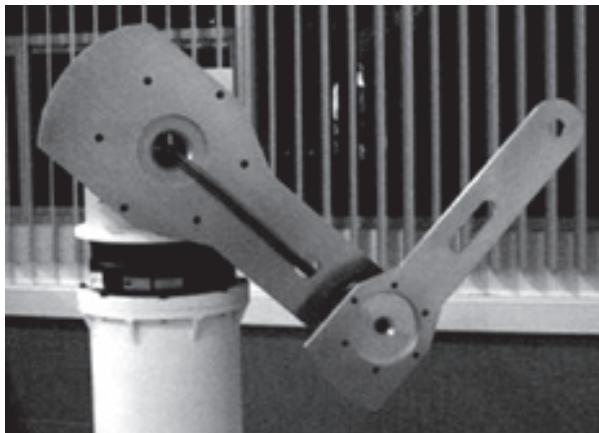


Figura 2: Robot experimental

La tarjeta de adquisición de datos MFIO3A, del fabricante Precision MicroDynamics[9-10], es utilizada para la interfaz del robot con la computadora.

Se emplea una computadora Pentium II a 333Mhz y con el compilador de Borland C, lenguaje en el que se desarrolló la aplicación.

7. Resultados experimentales

Los experimentos fueron realizados en el robot que se muestra en la Figura 2 con un periodo de muestreo de 0.0025 segundos. En este apartado se presentan los resultados experimentales de un controlador 1 y un controlador 2 con las ganancias mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2: Ganancias usadas en los experimentos.

	K_{p_1} [Nm]	K_{p_2} [Nm]	K_{p_3} [Nm]	K_{p_4} [Nm]	K_{p_5} [Nm]	K_{p_6} [Nm]
C 1	30	70	10	20	70	7
C 2	26.9	72.6	9.4	20	69.8	8

Las posiciones deseadas en el experimento de estos controladores constan de llevar al robot de la posición de casa a las posiciones deseadas, lo cual representa de la forma:

$$q(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad q_s = \begin{bmatrix} 45 \\ 45 \\ 90 \end{bmatrix} [\text{Grados}]$$

Caso de estudio controlador 1

En este apartado se presentan los resultados experimentales del control del caso de estudio 1.

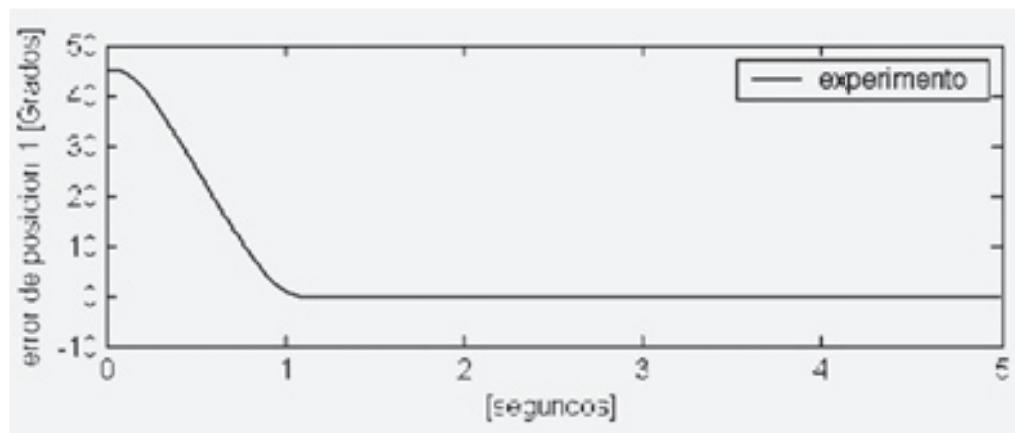


Figura 3: Error de posición de la base del caso de estudio 1.

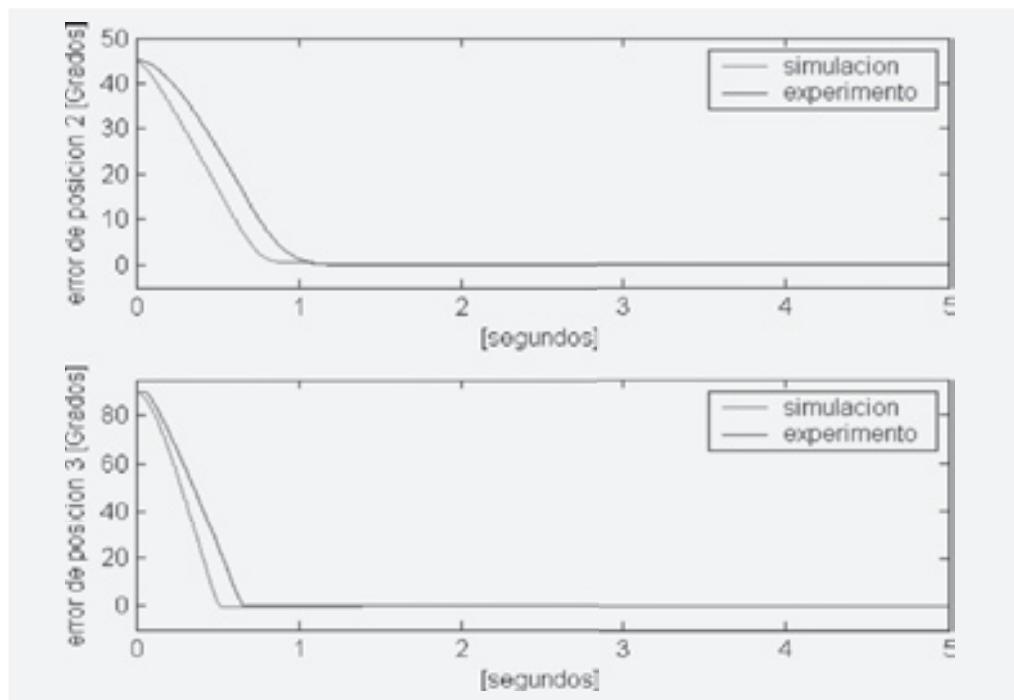


Figura 4: Error de posición del hombro y codo para el caso de estudio 1.

Caso de estudio controlador 2

En este apartado se presentan los resultados experimentales del controlador del caso de estudio 2.

Los valores del error de posición y el par aplicado a cada articulación en el estado estacionario se muestran en la Tabla 2.

Índice de desempeño

El desempeño de los controladores se realiza mediante la media de la norma L^2 la cual se puede escribir de la forma.¹¹⁻¹²

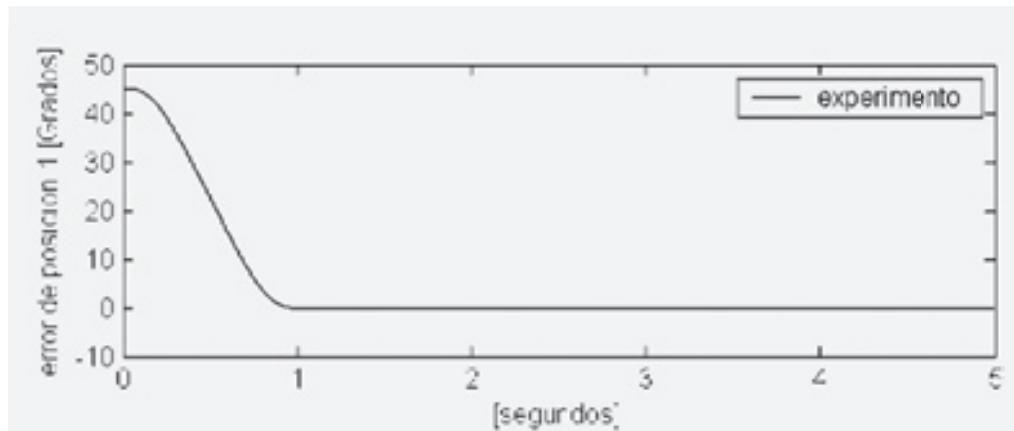


Figura 5: Error de posición de la base para el caso de estudio 2.

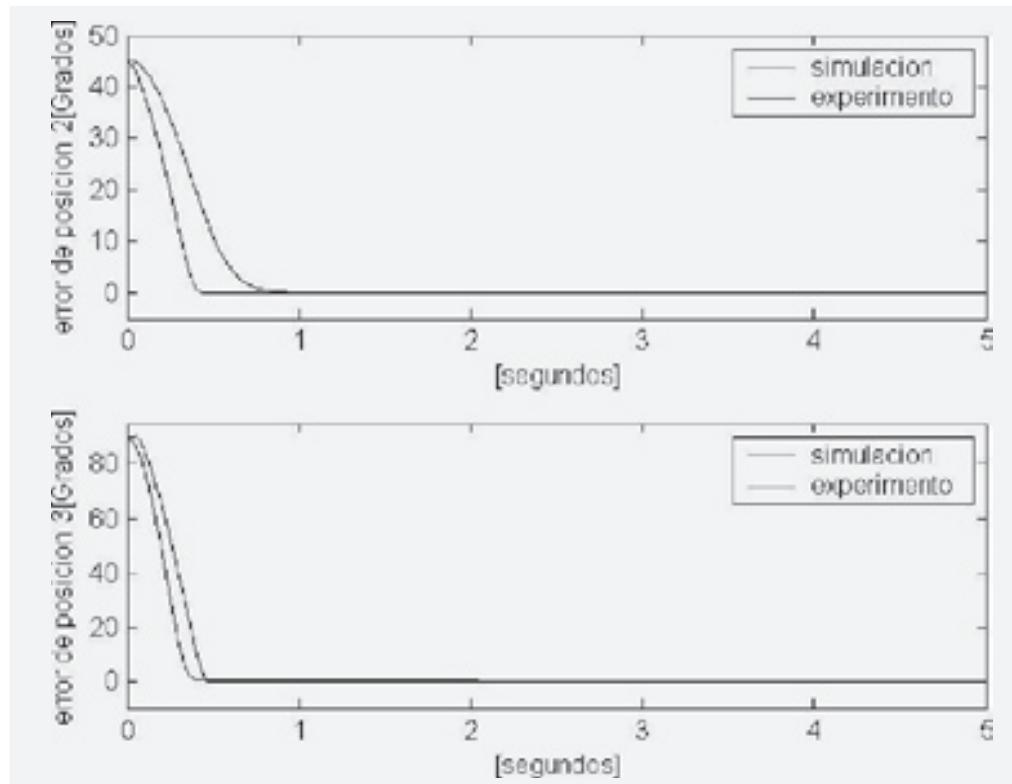


Figura 6: Error de posición del hombro y codo para el caso de estudio 2.

$$L^2[\bar{q}] = \sqrt{\frac{1}{t_f - t_0} \int_{t_0}^{t_f} \|\bar{q}\|^2 dt} \quad (12)$$

donde $t_0, t_f \in \mathbb{R}_+$, son el tiempo inicial y final respectivamente. Una norma $L^2[\bar{q}]$ pequeña representa el menor error de posición y en consecuencia un mejor desempeño del controlador. El índice de desempeño de los controladores se muestra en la Figura 7, en donde se observa que el controlador con mejor desempeño en estado estacionario fue el control del caso de estudio 1.

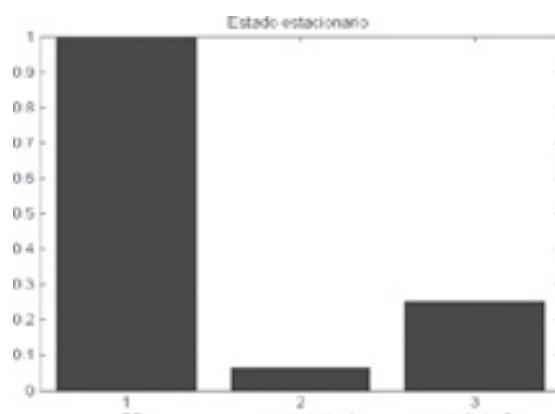


Figura 7: índice de desempeño de los controladores en estado estacionario.

Tabla 2: Error de posición para cada articulación del robot en (grados). C1 y C2 son los controladores de los casos de estudio 1 y 2, respectivamente

Ex.	\bar{q}_1	\bar{q}_2	\bar{q}_3	T_1	T_2	T_3
Grados			Nm			
C 1	.06	.06	.02	.16	47.5	1.51
C 2	.008	.01	.06	.00	47.2	1.57

Experimento de entrenamiento

Para el experimento con la plataforma de entrenamiento, se escogió el controlador con mejor desempeño, siendo este el controlador del caso de estudio 1. Una vez implementado el controlador en el programa presentado en este trabajo, en el modo grabar se introdujo una trayectoria deseada al robot moviéndolo directamente con la mano. Al reproducir la trayectoria grabada se observan como las siguió el robot en las Figuras 8.

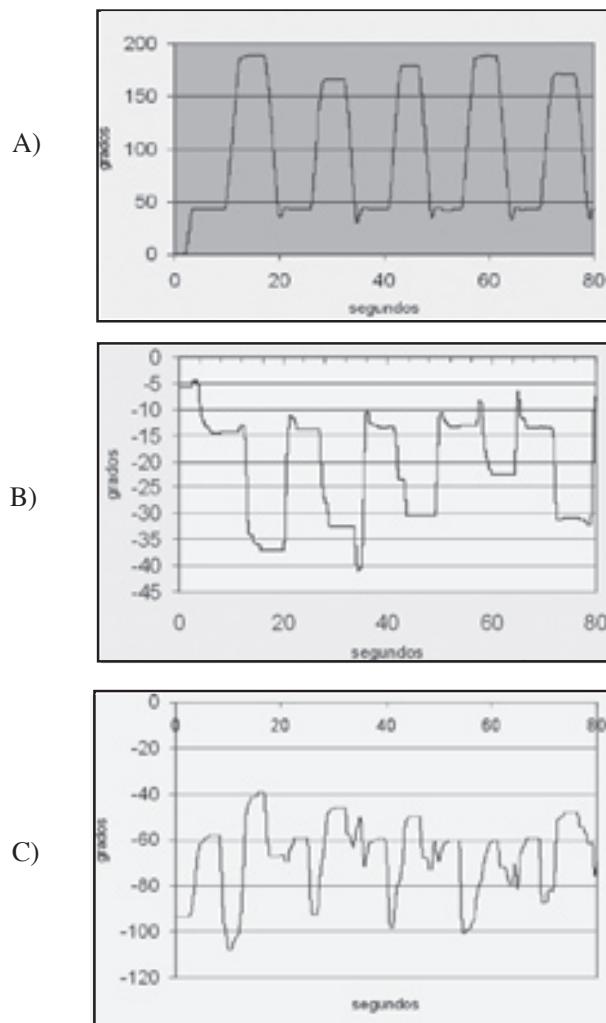


Figura 8. Secuencia de puntos alcanzados por el robot. A) Base del robot.
B) Hombro del robot. C) Codo del robot.

8. Conclusiones

En este artículo se propuso una plataforma de entrenamiento para robots manipuladores y una nueva familia de controladores de posición con compensación de gravedad para robots manipuladores, respaldada por un riguroso análisis de estabilidad. Con el propósito de validar la plataforma de entrenamiento se implementaron los controladores en forma matemática en el programa principal, el procedimiento adecuado para diseñar la nueva familia de controladores basta con seleccionar la ganancia proporcional y derivativa así como la matriz diagonal y la matriz simétrica definida positiva para asegurar estabilidad asintótica global.

Las pruebas experimentales se hicieron en tiempo real en un robot de transmisión directa de tres grados de libertad para mostrar los resultados de estabilidad de dos controladores como casos de estudio. De los resultados experimentales puede concluirse la utilidad de la plataforma de entrenamiento y de la familia de controladores.

Bibliografías

- [1] Craig, J. J. *introduction to robotics: Mechanics and control*. Addison-Wesley, Reading, MA. 1989.
- [2] R. Kelly “A Tuning procedure for Stable PID control of robot manipulator”. *Robotica*. Vol. 13. pp. 141-148. 1995.
- [3] Takegaki M. and S. Arimoto, A new feedback method for dynamic control of manipulators, *ASME J. Dynamic Systems Measurement Control*, 103, 119-125, Edition 1981.
- [4] R. Kelly, and R.Carelli, “A class of non-linear PD-Type controllers for robots manipulators”. *Journal of Robotic Systems* 13(12). Pp 793-802. 1996
- [5] Reyes F. Kelly R. “A Class of $P^{2w-1} - D$ type controller whit gravity Compensation for robot Manipulator”. *Congreso Latinoamericano de Control Automatico chile 1998*.
- [6] Spong M. and M. Vidyasagar, “Robot Dynamic and Control”, wiley, New York, 1989, Capítulo 2 -8, Apéndices A - C.
- [7] Khalil H. “Nonlinear control”, Prentice Hall USA, 2002.
- [8] Kelly R. & Santibáñez V. “Control de Movimiento de Robots Manipuladores”, Prentice Hall.
- [9] Reyes F. & R. Nelly, experimental evaluation of identification schemes on a direct drive robot, *Robotica*, 15, 1997. 563-571
- [10] Santibáñez V., R. Kelly y F. Reyes. ”A new set point Controller whit Bounder Torques for Robot Manipulator” IEEE Trans. on Industrial Electronics. Vol. 45, No.1, 1998. pp.126-133.
- [11] Berghuis, H., H. Roebbers & H. Nijmeijer, Experimental comparison of parameter estimation methods in adaptive robot control, *Automatica*, 31(9), 1995, 1275-1285.
- [12] Jariz, A., & M. Spong, An experimental comparison of robust control algorithms on a direct drive manipulator IEEE Transactions on Control Systems Technology, 4(6) 1996, 363-368.
- [13] Mills, James K; Baines, Philip; Chang, Thomas; Chew, Steven; Jones, Trevor; Lam Stephen, Rabadi, Adi; “”Development of a Robot Control Test Platfotm”, IEEE Robotics & Automation Magazine, Diciembre 1995.
- [14] Reyes, F.; Kelly, R. “A direct-drive robot for control research”; CICESE, México, IASTED-ACTA Press, Anaheim, CA USA. Hamza, M.H. p.181-4, : USA., 1995. ii+220 pp.